

論文の内容の要旨

論文題目	A study on boiling heat transfer of non-metallic nanoparticles in water-based nanofluid pool boiling (和訳) 非金属粒子を懸濁させた水ベースナノ流体のプール沸騰熱伝達に関する研究
学 位 申 請 者	Muhamad Zuhairi Bin Sulaiman

ナノ流体とは、ナノメートルサイズの微粒子を懸濁させた液体のことで、沸騰熱伝達における限界熱流束を大幅に増大させる効果があることから、高熱流束除熱を実現するための手段として、注目を集めている。本研究では、非金属ナノ粒子を懸濁させた水ベースのナノ流体を対象として、沸騰伝熱特性を系統的に調べた。具体的には、3種類の実験装置を用いて、伝熱面姿勢、ナノ粒子材料、ナノ粒子濃度、ナノ粒子分散状態、ナノ粒子層形成時の熱流束の影響を検討した。伝熱面姿勢としては、上向き面と下向き面で実験を実施し、限界熱流束(CHF)の絶対値は伝熱面姿勢によって異なるが、いずれの条件においてもナノ流体中のCHFは純水中の値の約2倍となることを示した。次に、ナノ流体中の沸騰熱伝達率は、ナノ粒子の材質および濃度により大きく異なり得ることを示した。ナノ粒子の材質として、本研究では TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 を使用した。が、 Al_2O_3 では伝熱促進、 SiO_2 では伝熱劣化が生じるのに対して、 TiO_2 では低粒子濃度で劣化、高粒子濃度で向上する結果となった。一方、ナノ流体中における粒子の分散状況は、本実験で調べた範囲内において、沸騰熱伝達に及ぼす影響は顕著ではなかった。また、各実験条件で沸騰曲線を描いたところ、 Al_2O_3 ナノ流体では水の場合と類似の沸騰曲線が得られたのに対して、 TiO_2 と SiO_2 では、高熱流束条件で壁面過熱度が大きく増加するという独特の振る舞いを呈する場合があった。ただし、計測されたCHF値は $1.7 \sim 2.1 \text{ MW/m}^2$ の範囲にあり、純水中のCHFよりも顕著に増大するものの、ナノ粒子の材質、濃度、分散状態による明確な影響は認められなかった。これに対して、伝熱面上にナノ粒子層を形成する際の熱流束は、CHF値に多大な影響を及ぼした。すなわち、高熱流束条件では、ナノ粒子層を形成する際の沸騰時間が短くても顕著なCHF増大を実現できるのに対して、低熱流束条件では十分なCHF向上を達成する伝熱面状態とするのにきわめて長いナノ粒子層形成時間を要した。特に、本研究で用いた最低熱流束条件では、ナノ流体中で沸騰状態を1時間継続した場合でも、十分なCHF向上効果を発現するには至らなかった。本研究では、純水中にナノ粒子を添加した後の熱伝達率の時間変化を様々な条件で調べたが、ナノ粒子の添加直後では、熱伝達率が向上する場合が多かった。そこで、ナ

ノ流体中における熱伝達率変化のメカニズムについて知見を得るため、透明容器を用いた可視化実験を実施して、ナノ粒子天下の前後における沸騰気泡の生成状況の差異を検討した。この結果、ナノ粒子を加えた直後、より多数の発泡核で気泡生成が生じることが観察された。これより、伝熱面上にナノ粒子層が形成される際に、そのいくつかの部分が気泡生成核となり、核沸騰熱伝達の促進に寄与することを示した。

本論文は、全8章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論、第2章は文献調査の結果、第3章は実験装置の説明である。

第4章では、伝熱面姿勢の影響について論じた。上向き面と下向き面の何れにおいても、試験流体中にナノ粒子を懸諾させることで、約2倍の限界熱流束(CHF)向上効果が得られるが、ナノ粒子の有無によらず、下向き面のCHFは上向き面の0.5倍程度であることを示した。

第5章では、ナノ粒子の材質、濃度、分散状況が、沸騰熱伝達特性に及ぼす影響を調べた。この結果、ナノ粒子の材質と濃度は、熱伝達率に顕著な影響を及ぼすが、粒子分散状況の影響は顕著ではなかった。一方、ナノ流体に対するCHFの計測結果は、 $1.7 \sim 2.1 \text{ MW/m}^2$ の範囲にあり、粒子の材質、濃度、分散状況に対する明確な依存性は認められなかった。

第6章では、伝熱面上におけるナノ粒子層の形成状況に及ぼす熱流束の影響を調べた。この結果、熱流束の増加とともにナノ粒子層の形成が促進され、より短時間でCHF向上効果が得られることを示した。

第7章では、ナノ流体による熱伝達率変化のメカニズムを探るため、可視化実験を実施した。この結果、伝熱面上にナノ粒子層が形成されると、多数の蒸気泡が形成されるとともに伝熱面温度が低下したことから、ナノ粒子層上における沸騰核の形成が伝熱促進の一因と考えられることを示した。

第8章は全体のまとめと今後の展望である。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 Muhamad Zuhairi Bin Sulaiman

審査委員主査 大川 富雄

委員 前川 博

委員 宮寄 武

委員 Matuttis Hans-Georg

委員 正本 和人

委員

委員

ナノ流体とは、ナノメートルサイズの微粒子を懸濁させた液体のことで、沸騰熱伝達における限界熱流束を大幅に増大させる効果があることから、高熱流束除熱を実現するための手段として、注目を集めている。本研究では、非金属ナノ粒子を懸濁させた水ベースのナノ流体を対象として、沸騰伝熱特性を系統的に調べた。具体的には、3種類の実験装置を用いて、伝熱面姿勢、ナノ粒子材料、ナノ粒子濃度、ナノ粒子分散状態、ナノ粒子層形成時の熱流束の影響を検討した。伝熱面姿勢としては、上向き面と下向き面で実験を実施し、限界熱流束(CHF)の絶対値は伝熱面姿勢によって異なるが、いずれの条件においてもナノ流体中のCHFは純水中の値の約2倍となることを示した。次に、ナノ流体中の沸騰熱伝達率は、ナノ粒子の材質および濃度により大きく異なり得ることを示した。ナノ粒子の材質として、本研究では TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 を使用した。が、 Al_2O_3 では伝熱促進、 SiO_2 では伝熱劣化が生じるのに対して、 TiO_2 では低粒子濃度で劣化、高粒子濃度で向上する結果となった。一方、ナノ流体中における粒子の分散状況は、本実験で調べた範囲内において、沸騰熱伝達に及ぼす影響は顕著ではなかった。また、各実験条件で沸騰曲線を描いたところ、 Al_2O_3 ナノ流体では水の場合と類似の沸騰曲線が得られたのに対して、 TiO_2 と SiO_2 では、高熱流束条件で壁面過熱度が大きく増加するという独特の振る舞いを呈する場合があった。ただし、計測されたCHF値は $1.7 \sim 2.1 \text{ MW/m}^2$ の範囲にあり、純水中のCHFよりも顕著に増大するものの、ナノ粒子の材質、濃度、分散状態による明確な影響は認められなかった。これに対して、伝熱面上にナノ粒子層を形成する際の熱流束は、CHF値に多大な影響を及ぼした。すなわち、高熱流束条件では、ナノ粒子層を形成する際の沸騰時間が短くても顕著なCHF増大を実現できるのに対して、低熱流束条件では十分なCHF向上を達成する伝熱面状態とするのにきわめて長いナノ粒子層形成時間を要した。特に、本研究で用いた最低熱流束条件では、ナノ流体中で沸騰状態を1時間継続した場合でも、十分なCHF向上効果を発現するには至らなかった。本研究では、純水中にナノ粒子を添加した後の熱伝達率の時間変化を様々な条件で調べたが、ナノ粒子の

添加直後では、熱伝達率が向上する場合が多かった。そこで、ナノ流体中における熱伝達率変化のメカニズムについて知見を得るため、透明容器を用いた可視化実験を実施して、ナノ粒子天下の前後における沸騰気泡の生成状況の差異を検討した。この結果、ナノ粒子を加えた直後、より多数の発泡核で気泡生成が生じることが観察された。これより、伝熱面上にナノ粒子層が形成される際に、そのいくつかの部分が気泡生成核となり、核沸騰熱伝達の促進に寄与することを示した。

本論文は、全8章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論、第2章は文献調査の結果、第3章は実験装置の説明である。

第4章では、伝熱面姿勢の影響について論じた。上向き面と下向き面の何れにおいても、試験流体中にナノ粒子を懸濁させることで、約2倍の限界熱流束(CHF)向上効果が得られるが、ナノ粒子の有無によらず、下向き面のCHFは上向き面の0.5倍程度であることを示した。

第5章では、ナノ粒子の材質、濃度、分散状況が、沸騰熱伝達特性に及ぼす影響を調べた。この結果、ナノ粒子の材質と濃度は、熱伝達率に顕著な影響を及ぼすが、粒子分散状況の影響は顕著ではなかった。一方、ナノ流体に対するCHFの計測結果は、 $1.7 \sim 2.1 \text{ MW/m}^2$ の範囲にあり、粒子の材質、濃度、分散状況に対する明確な依存性は認められなかった。

第6章では、伝熱面上におけるナノ粒子層の形成状況に及ぼす熱流束の影響を調べた。この結果、熱流束の増加とともにナノ粒子層の形成が促進され、より短時間でCHF向上効果が得られることを示した。

第7章では、ナノ流体による熱伝達率変化のメカニズムを探るため、可視化実験を実施した。この結果、伝熱面上にナノ粒子層が形成されると、多数の蒸気泡が形成されるとともに伝熱面温度が低下したことから、ナノ粒子層上における沸騰核の形成が伝熱促進の一因と考えられることを示した。

第8章は全体のまとめと今後の展望である。

本論文は、非金属ナノ粒子を懸濁した水ベースのナノ流体を対象に、沸騰熱伝達に及ぼす伝熱面姿勢、粒子材質、粒子濃度、粒子分散状況、ナノ粒子層形成時の熱流束が、核沸騰熱伝達特性に及ぼす影響を実験的かつ系統的に調べたものであり、高熱流束除熱を経済的に実現する上で有用な成果を得るとともに、熱伝達性能向上メカニズムについても検討を実施している。これより、本論文は、博士(工学)の学位論文として、十分な価値を有するものと認める。